

## Revisão integrativa da análise de exergia no corpo humano

### Integrative review of exergy analysis in the human body

### Revisión integrativa del análisis de exergía en el cuerpo humano

Recebido: 26/05/2022 | Revisado: 12/06/2022 | Aceito: 12/06/2022 | Publicado: 23/06/2022

#### **Ana Carolina Nóbrega Leite**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9777-8518>  
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil  
E-mail: [anacarinolanobregaleite@gmail.com](mailto:anacarinolanobregaleite@gmail.com)

#### **Glaucio de Meneses Souza**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5708-7010>  
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil  
E-mail: [glauciopsl@hotmail.com](mailto:glauciopsl@hotmail.com)

#### **Juliana Cruz Albuquerque**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0771-2847>  
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil  
E-mail: [julianalbuquerquepb@hotmail.com](mailto:julianalbuquerquepb@hotmail.com)

#### **Maria das Neves de Sá Catão**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9113-8360>  
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil  
E-mail: [maria.sa@estudante.ufcg.edu.br](mailto:maria.sa@estudante.ufcg.edu.br)

#### **Priscylla Palmeira Diniz**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7261-8553>  
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil  
E-mail: [priscylla.palmeira@gmail.com](mailto:priscylla.palmeira@gmail.com)

#### **Raniza de Oliveira Carvalho**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0442-7231>  
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil  
E-mail: [RANIZA.OLIVEIRA@estudante.ufcg.edu.br](mailto:RANIZA.OLIVEIRA@estudante.ufcg.edu.br)

#### **Herbet Lima Oliveira**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4023-5045>  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil  
E-mail: [2hloliveira@gmail.com](mailto:2hloliveira@gmail.com)

#### **José Jefferson da Silva Nascimento**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2620-6491>  
Universidade Federal de Campina Grande, Brasil  
E-mail: [jeffpesquisador@gmail.com](mailto:jeffpesquisador@gmail.com)

#### **Resumo**

A combinação das leis fundamentais da termodinâmica resulta na exergia, uma grandeza que representa quantitativamente a capacidade de realizar trabalho útil. Sempre que a energia é usada, nos processos em que a energia é convertida em trabalho útil, uma parte dela é perdida. A eficiência exergetica é um fator útil de racionalidade para os consumos e desperdícios de sistemas. Diversos autores destacam a importância da análise exergetica em diferentes aspectos da vida, podendo ela ser aplicada ao corpo humano para avaliação da qualidade dos processos de conversão de energia em sistemas biológicos, bem como nos processos bioquímicos do metabolismo. O objetivo do presente artigo é realizar uma revisão integrativa da literatura acerca da relação entre análise de exergia e os processos associados aos sistemas do corpo humano. As pesquisas desenvolvidas ao longo dos anos têm demonstrado um crescente interesse no tema e apresentam um importante aperfeiçoamento dos modelos matemáticos de análise exergetica, contribuindo para uma melhor compreensão do rendimento do corpo humano e seus sistemas a partir das leis e conceitos da termodinâmica. Além disso, criam-se perspectivas futuras de utilização do desempenho exergetico para auxílio no campo da medicina.

**Palavras-chave:** Análise exergetica; Eficiência exergetica; Sistemas biológicos; Termodinâmica; Transferência de energia.

#### **Abstract**

The combination of the fundamental laws of thermodynamics results in exergy, a size that quantitatively represents the ability to do useful work. Whenever energy is used, in processes where energy is converted into useful work, some of it is lost. The exergetic efficiency is a useful factor of rationality for the consumption and waste of systems. Several authors highlight the importance of exergetic analysis in different aspects of life, and it can be applied to the human body to assess the quality of energy conversion processes in biological systems, as well as in the biochemical

processes of metabolism. The objective of the present article is to carry out an integrative review of the literature on the relationship between exergy analysis and the processes associated with the systems of the human body. The research developed over the years has shown a growing interest in the subject and presents an important improvement of the mathematical models of exergetic analysis, contributing to a better understanding of the performance of the human body and its systems from the laws and concepts of thermodynamics. In addition, future perspectives are created for the use of exergetic performance to aid in the field of medicine.

**Keywords:** Exergetic analysis; Exergetic efficiency; Biological systems; Thermodynamics; Energy transfer.

### Resumen

La combinación de las leyes fundamentales de la termodinámica resulta en la exergía, una cantidad que representa cuantitativamente la capacidad de realizar un trabajo útil. Siempre que se usa energía, en procesos donde la energía se convierte en trabajo útil, parte de ella se pierde. La eficiencia exergetica es un factor útil de racionalidad para el consumo y desperdicio de los sistemas. Varios autores destacan la importancia del análisis exergetico en diferentes aspectos de la vida, pudiendo ser aplicado al cuerpo humano para evaluar la calidad de los procesos de conversión de energía en los sistemas biológicos, así como en los procesos bioquímicos del metabolismo. El objetivo de este artículo es realizar una revisión integradora de la literatura sobre la relación entre el análisis análisis de exergía y los procesos asociados a los sistemas del cuerpo humano. La investigación desarrollada a lo largo de los años ha mostrado un creciente interés por el tema y presenta una importante mejora de los modelos matemáticos de análisis exergetico, contribuyendo a una mejor comprensión del funcionamiento del cuerpo humano y sus sistemas a partir de las leyes y conceptos de la termodinámica. Además, se crean perspectivas futuras para el uso del rendimiento exergetico para ayudar en el campo de la medicina.

**Palabras clave:** Análisis exergetica; Eficiencia exergetica; Sistemas biológicos; Termodinámica; Transferencia de energía.

## 1. Introdução

A termodinâmica é definida como a ciência da energia e seu nome deriva das palavras gregas *thérme* (calor) e *dýnamis* (força), que descrevem os esforços da conversão de calor em força. Embora pareça um conceito simples, a definição de energia pode ser difícil de ser estabelecida, podendo ser compreendida como a capacidade de causar alterações. A termodinâmica é regida por algumas de suas leis básicas. A primeira lei da termodinâmica se baseia no princípio de conservação da energia e estipula que, em qualquer processo na natureza, a energia é sempre conservada, ou seja, não pode ser criada ou destruída (Çengel & Boles, 2013).

Enquanto a primeira lei diz respeito à quantidade de energia e às transformações de energia de uma forma para outra, sem levar em conta sua qualidade, a segunda lei da termodinâmica diz que a energia tem qualidade, assim com quantidade, e que os processos reais ocorrem na direção da diminuição da qualidade da energia. A preservação da qualidade da energia é uma grande preocupação no estudo de sistemas termodinâmicos, e a segunda lei oferece os meios necessários para determinar a qualidade, bem como o nível de degradação da energia durante um processo (Çengel & Boles, 2013; Smith et al., 2007).

A segunda lei não proíbe a produção de trabalho a partir de calor, porém ela coloca um limite na quantidade de calor adicionada em um processo cíclico que pode ser convertida em trabalho efetuado pelo processo. Então, pode-se afirmar que em cada forma de transferência de energia, uma certa quantidade é transformada de uma forma útil para uma menos útil, o que implica na existência de níveis de qualidade diferentes. Assim, em todos os processos que convertem energia em trabalho útil, alguma energia é convertida para uma de menor qualidade, e, sempre que a energia é usada, uma parte dela é perdida. Esse potencial de trabalho desperdiçado ou a oportunidade perdida de realizar trabalho é denominado de exergía destruída (Smith et al., 2007; Araujo et al., 2019).

A exergía quantifica o “potencial de uso”, ou seja, o máximo trabalho teórico possível de ser obtido a partir de um sistema global, composto por um sistema e o ambiente, conforme o sistema e sua vizinhança interagem de modo que o sistema atinja o equilíbrio com o meio (Gonçalves & Gaspar, 2011). No entanto, deve-se notar que parte da exergía que entra na fronteira do sistema é inevitavelmente perdida por causa de irreversibilidades internas (Petela, 2010). Dessa forma, a avaliação de desempenho exergetico permite a quantificação da exergía destruída em cada etapa do processo, identificação das causas

das irreversibilidades do sistema, comparação de diferentes condições e seleção das condições mais eficientes de um processo (Silva et al., 2018).

A exergia está envolvida nos processos em que se operam conversões de energia, tais como: a irreversibilidade dos processos reais; a transformação de energia térmica em trabalho; e a indicação do limite até onde a energia pode ser útil (Gonçalves & Gaspar, 2011). Assim como a termodinâmica possui um amplo campo de aplicações, que vai desde os organismos microscópicos até aplicações industriais de sistemas de geração de potência, a determinação da eficiência exérgica é um fator útil de racionalidade para os consumos e desperdícios nos sistemas industriais. Partindo deste princípio, é possível relacionar o que ocorre em processos mecânicos com o rendimento do corpo humano, onde acontecem uma série de processos de conversão de energia que garantem o seu funcionamento.

O corpo humano sendo visto como o sistema fechado a ser estudado, de acordo com o que sugere a segunda lei da termodinâmica, para conservá-lo em um bom estado, é imprescindível que energia seja inserida nesse sistema. Desta forma, se torna essencial conhecer a capacidade que os humanos têm de controlar as distintas formas de energia a sua volta (Bandeira, 2016). A segunda lei da termodinâmica é fundamental para compreensão dos fenômenos de evolução, crescimento, envelhecimento e morte. O campo da termodinâmica biológica abrange não apenas seres vivos e não vivos, mas também sociedades, e para entender o crescimento, envelhecimento e fim do sistema natural, deve-se conhecer a entropia (Patel & Rajput, 2021).

De acordo com Guo et al. (2019), podemos utilizar o conceito de exergia para analisar um corpo humano como um emissor de calor. Enquanto o corpo gera calor continuamente, ele permanece aproximadamente na mesma temperatura através de respostas fisiológicas, como calafrios, sudorese, respiração, elevando/diminuindo assim a temperatura da pele, para manter a eficácia da dissipação de calor. Sousa et al. (2020) observaram que a análise exérgica do conforto térmico no corpo humano é relevante para diversos aspectos da vida cotidiana. Conforme Mady (2014), a análise exérgica é aplicada ao corpo humano para avaliar a qualidade dos processos de conversão de energia no corpo e seus sistemas, assim como nos processos bioquímicos do metabolismo.

Diversos autores propuseram o uso da abordagem exérgica para analisar os sistemas fisiológicos do corpo humano sob diferentes condições físicas, dado que tal perspectiva foca nas transformações exérgicas e a eficiência dos processos biológicos. Esse tipo de análise pode auxiliar a medicina na avaliação da saúde física de um paciente por meio de um índice (eficiência exérgica) baseado na qualidade da conversão de energia em um determinado processo do corpo humano. Além disso, a análise exérgica do corpo humano e de seus órgãos pode aprofundar a compreensão de processos energéticos que podem não ser claros para a área médica, ampliando o conhecimento de como o envelhecimento e as patologias podem afetar o comportamento do corpo (Roll et al., 2019).

Dessa forma, objetiva-se fazer uma revisão da literatura acerca da relação existente entre o desempenho termodinâmico e o funcionamento do corpo humano, com foco na análise exérgica e irreversibilidade dos processos relacionados aos sistemas do corpo.

## **2. Metodologia**

A metodologia utilizada neste trabalho foi do tipo exploratória-descritiva qualitativa, por meio de uma pesquisa bibliográfica do tipo revisão integrativa de literatura. A elaboração do trabalho seguirá os princípios do estudo exploratório, que consiste em uma releitura de materiais bibliográficos de determinado tema, por meio de trabalhos acadêmicos publicados, tais como, artigos científicos, livros, monografias, dissertações e teses (Santos, 2017). Para o levantamento dos artigos publicados em revistas científicas realizou-se uma busca na base de dados Periódicos do Google Acadêmico e Capes, a partir de acesso institucional da Universidade Federal de Campina Grande.

A revisão integrativa de literatura tem a finalidade sintetizar os resultados obtidos em pesquisas de determinado tema, de forma metódica, ordenada e compreensiva. A revisão integrativa é tida como uma pesquisa auxiliar e de análise do que já existe, ou seja, que já foi publicado, que por meio do uso de métodos sistemáticos e pré-definidos ajudam o pesquisador, esclarecendo discussões encontradas em pesquisas científicas publicadas sobre referido tema (Lima et al., 2017).

Para busca dos artigos foram usados os seguintes descritores: “exergia”, “análise exergética”, “eficiência exergética”, “conforto térmico” e “corpo humano”, nos idiomas português e inglês. As pesquisas nas bases de dados foram configuradas para buscar as palavras nos campos “título”, “resumo” e “palavras-chave”. Foi utilizado o operador booleano “and” com o objetivo de induzir que os termos selecionados constassem nos referidos campos. Quanto aos critérios de inclusão foram selecionados para a revisão de literatura artigos em português, inglês e espanhol, artigos publicados e indexados nas referidas bases de dados nos últimos doze anos (2010-2022). Foram incluídos também Trabalhos de Conclusão de Curso, Teses e Dissertações sobre o tema. Para selecionar e organizar as informações dos trabalhos selecionados da base de dados foi realizada a leitura dos títulos, resumos e resultados apresentados.

### 3. Análise Exergética no Corpo Humano

Moran e Shapiro (2006) definiram exergia como sendo o trabalho máximo teórico possível de ser alcançado conforme o ambiente de referência interaja até o equilíbrio com o sistema desejado. Por conseguinte, segundo Torío et al. (2009), a exergia é uma medida do potencial de um fluxo de energia para ser transformada em energia de alta qualidade. A análise exergética tem sido aplicada desde a década de 1970, tendo como objetivo primordial, encontrar mais utilização racional da energia, ou seja, ao mesmo tempo reduzindo consumo de combustíveis fósseis e transformando a aplicação de eficiência exergética.

Os animais homeotérmicos são aqueles que possuem um sistema térmico, como os seres humanos, em que esse sistema atua de forma a manter a temperatura interna constante, corpo humano é formado por dois subsistemas: o sistema passivo e o sistema de controle. De acordo com Pennes (1948), o sistema passivo é representado pelo balanço de energia e massa nos tecidos que compõem o corpo humano. É considerada a condução tridimensional de calor, a transferência de calor entre sangue e tecidos, entre grandes artérias, no trato respiratório e a transferência de calor e massa entre o corpo e o meio ambiente. Algumas das transferências de energia que acontecem no interior do corpo, e entre o corpo e o meio ambiente no qual ele está inserido são: o metabolismo do corpo, respiração, sudorese, convecção, radiação e condução.

Prek e Butala (2010) descreveram a aplicação da análise de exergia ao calor humano e à troca de massa com o ambiente interno. Os autores tiveram como base estudos que mostravam a existência de uma semelhança entre os parâmetros que definem a transferência de calor e massa humana regida por processos fisiológicos e os parâmetros que definem a destruição de exergia. A destruição da exergia foi determinada usando um modelo térmico humano estendido de dois nós e a aplicação da análise de exergia à transferência de calor e massa humana foi calculada para cada processo de transferência de calor e massa separadamente, de acordo com o tipo de exergia e respeitando o estado de referência interno. Os resultados forneceram informações sobre as complexas interações entre o corpo humano e o meio ambiente e destacam a semelhança entre processos fisiológicos humanos complexos definidos, como a interação entre temperaturas, fluxos de calor e massa e a destruição de exergia. Além disso, a análise indica que, em dados parâmetros fisiológicos, apenas uma certa combinação de condições ambientais garante uma destruição de exergia mínima. Essas condições ambientais e humanas coincidem com o nível esperado de conforto térmico.

Segundo Turhan e Akkurt (2019), o corpo humano trabalha para regular a entropia gerada dentro do corpo pelo seu metabolismo, a fim de manter a temperatura central do corpo o mais constante possível. A capacidade de fazer isso é afetada pelos parâmetros pessoais (massa corporal, superfície da pele, atividade, roupa etc.) e articulada como o conforto térmico.

No que diz respeito ao conforto térmico humano, as irreversibilidades podem ser avaliadas com base em parâmetros relacionados tanto ao ocupante quanto ao seu entorno. A estrutura do modelo termodinâmico para a análise exérgica de conforto térmico deve ser baseada nas equações conceituais de balanço de energia, juntamente com correlações empíricas para as taxas de transferência de calor termorreguladoras adaptadas para um corpo vestido submetido a diferentes combinações de ar ambiente e temperaturas radiantes médias (Rabi et al., 2012).

As primeiras tentativas de quantificar o conforto térmico utilizaram termodinamicamente a análise de entropia para descrever a fisiologia humana, tendo como origem a análise de entropia de longo prazo de organismos vivos (Guo et al., 2019). Batato et al. (1990) melhoraram a análise de entropia do corpo humano implementando primeiro a abordagem exérgica na análise do equilíbrio do corpo humano.

Como o corpo humano sempre tenta se ajustar à condição ambiental, existe a necessidade de que o conforto térmico estabeleça uma conexão entre o estresse térmico externo e as capacidades de termorregulação humana, como perda e armazenamento de calor. Caliskan (2013) comparou as análises de energia e exergia aplicadas ao sistema do corpo humano para uma temporada de verão, para obter o consumo do corpo e fazer uma avaliação do conforto térmico. Foi observado que as taxas de energia e exergia do metabolismo são a maior parte da geração de energia do corpo humano, no entanto, a taxa de energia do metabolismo é muito maior do que o exérgico correspondente. O resultado sugere que a exergia do metabolismo é afetada pelo ambiente de referência e pelas temperaturas centrais do corpo, enquanto a energia do metabolismo não. Os resultados também demonstraram que a perda máxima de energia do corpo humano ocorre devido à troca de calor, como radiação, convecção e condução. Os 70,59% da energia total são perdidos pela troca de calor que está relacionada com a temperatura da pele e da roupa, enquanto 6,393% da exergia total do corpo humano são perdidos pela expiração do ar úmido.

Em uma pessoa saudável, o metabolismo energético deve funcionar em condições de estado estacionário, de modo que qualquer desvio das condições de estado estacionário pode levar a sérias consequências. Genc et al. (2013) observaram que a simulação da destruição exérgica dinâmica do metabolismo da glicose no neurônio pode ajudar a entender o comportamento da célula sob condições de estresse e o efeito de mudanças na célula. Neste estudo as destruições dinâmicas de exergia foram calculadas para quatro condições diferentes: normóxia, hipóxia, privação de glicose e excesso de glicose. O modelo dinâmico previu que tanto a destruição de exergia quanto as taxas de potencial de trabalho aumentam com o aumento da concentração de glicose no sangue, ou seja, que o metabolismo neuronal funciona de maneira eficiente e muda para menor destruição de exergia sob condições de estresse. O comportamento observado neste estudo de análise exérgica confirma a hipótese de produção mínima de entropia em sistemas vivos.

Mady et al. (2013) aplicaram indicadores de desempenho para indivíduos em atividade física baseados nos conceitos de exergia destruída e eficiência de exergia. Para realizar a análise de exergia durante o teste cardiopulmonar de exercício, foi necessário calcular as taxas de calor e fluxo de massa associadas à radiação, convecção, vaporização e respiração, determinadas a partir das medidas e algumas relações encontradas na literatura. O estudo demonstrou que para a mesma exergia/ ou transferência de exergia destruída para o corpo associada ao metabolismo, os indivíduos com melhor condicionamento físico são capazes de realizar uma porcentagem maior do trabalho disponível, ou seja, que a eficiência exérgica do corpo aumenta de acordo com o nível de atividade física. Também foi observado que a relação entre a exergia destruída e a exergia metabólica tende a diminuir em função da idade do indivíduo.

Segundo Henriques (2013), a análise exérgica é aplicada ao corpo humano para determinar o comportamento exérgico padrão do corpo e do seu sistema respiratório para uma pessoa saudável em diferentes condições ambientais e intensidades de atividade física. Para isso, é necessário realizar os cálculos das taxas de exergia destruída, eficiências exérgicas do pulmão e do corpo para diferentes altitudes, temperaturas, umidades relativas, intensidade de atividade física e períodos de aclimação.

Henriques (2013) propôs um modelo exerético baseado no modelo de transferência de calor e massa presente na literatura para a análise exerética do sistema respiratório. A análise exerética foi aplicada a dois volumes de controle: o corpo e o sistema respiratório, que compreende as vias aéreas e os pulmões. Os resultados obtidos indicam que a eficiência exerética do pulmão diminui com a altitude e atividade física, enquanto a do corpo aumenta para ambos os parâmetros. Apesar dos comportamentos distintos entre os volumes de controle, observou-se que o corpo foi mais influenciado pela intensidade da atividade física, enquanto sistema respiratório foi mais suscetível a alterações das condições ambientais.

A análise exerética do corpo humano é uma ferramenta que pode fornecer indicadores de saúde e qualidade de vida. Mady e Oliveira Junior (2013) realizaram análises do metabolismo humano em base energética e exerética e sugeriram um método e uma equação para calcular a exergia metabólica a partir de resultados de calorimetria indireta, baseados em dados obtidos por Batato et al. (1990) e Diener (1997). Os resultados, para as condições basais e durante as atividades físicas, indicam que a diferença entre o metabolismo exerético e energético é inferior a 5%, e, assim, a oxidação de proteínas pode ser desconsiderada em uma pessoa saudável. Além disso, foi observado que o corpo converte aproximadamente 60% da exergia de nutrientes em exergia disponível para realizar o trabalho.

Através da realização da análise exerética é possível avaliar as irreversibilidades internas e externas dos processos fisiológicos do corpo humano. Dovjak et al. (2015) aplicaram a análise exerética considerando as interações entre ambiente interno e ambiente externo, como entre ambiente interno e o ser humano. Considerando-se dois tipos de ambientes internos: termicamente isolados e não isolados. Levando em conta as variações de parâmetros externos característicos de quatro condições climáticas (clima temperado, frio, quente e seco, quente e úmido), foi demonstrado que o isolamento térmico do ambiente interno resulta na diminuição da exergia destruída no corpo humano para as quatro condições analisadas.

As doenças cardiovasculares são a principal causa de morte entre as pessoas obesas. Por isso, para melhor compreender o comportamento exerético do corpo humano em condições patológicas, Henriques et al. (2016) desenvolveram um modelo exerético do coração humano. O coração foi dividido em dois volumes de controle: o coração esquerdo, que bombeia o sangue arterial dos pulmões para os órgãos, e o coração direito, que bombeia o sangue venoso dos órgãos para os pulmões. Assim, um modelo exerético do coração humano foi proposto e aplicado a três níveis diferentes de atividade física, bem como para indivíduos magros com e sem hipertensão. Os resultados da exergia destruída mostraram que tanto o exercício quanto a hipertensão aumentam a destruição da exergia no coração humano devido ao aumento da pressão arterial e consequente aumento da potência de bombeamento e exergia do metabolismo. A exergia destruída na parte esquerda do coração foi maior que a da direita para todos os cenários avaliados, sendo responsável por mais de 80% da destruição total de exergia. Além disso, a diferença entre a taxa de exergia destruída em corações normotensos e hipertensos foi usada para estimar como a hipertensão afeta a expectativa de vida. Os pesquisadores observaram que o aumento do valor da taxa de exergia destruída no coração hipertenso, quando integrado ao longo do ciclo de vida, causaria uma redução de 4,4 anos na expectativa de vida.

Alguns autores relacionam a análise exerética ao conforto térmico, afirmando que as condições ambientais para destruição mínima de exergia correspondem às condições de conforto térmico. Henriques et al. (2017) determinaram a taxa de exergia destruída no corpo humano em função da variação da umidade relativa e da temperatura, para três níveis de atividade física: em repouso, caminhada e corrida a 10 km/h. Os resultados indicam que, quanto maior a umidade relativa, menor a temperatura de conforto térmico e, para a mesma umidade, quanto maior a intensidade do exercício, menor a temperatura de conforto térmico. Observou-se ainda que o incremento de 10% na umidade relativa leva a uma redução de 1,8 °C na temperatura de conforto.

Rodriguez-Illera et al. (2017) propuseram uma ligação entre análise exerética e nutrição para explicar a eficiência exerética no metabolismo de nutrientes de alimentos no corpo humano, através da associação das perdas causadas por

ineficiências durante a digestão, absorção e conversão metabólica de nutrientes. Foi realizada uma análise exérgica de quatro diferentes produtos ricos em carboidratos para comparar as suas ineficiências globais. Foi observado que existe uma grande influência da variabilidade do índice glicêmico na exérgia destruída da cadeia final, confirmando a relevância da inclusão da biodisponibilidade de nutrientes na avaliação da sustentabilidade de cadeias industriais de processamento de alimentos.

Ribeiro (2018) realizou um estudo de análise exérgica aplicada ao corpo humano para a obtenção de indicadores de conforto térmico. Segundo a autora, o sistema de controle está relacionado com a resposta fisiológica, e atua buscando manter a energia interna do corpo, e consequentemente a temperatura interna corporal, constante. Fazem parte desses sistemas de controle os mecanismos vasomotores (vasodilatação e vasoconstrição), mecanismo sudomotor (sudorese) e contrações musculares (calafrios). A partir do trabalho, observou-se que a taxa de exérgia destruída está diretamente relacionada com a taxa de metabolismo do corpo humano. Em ambientes de baixa temperatura a taxa de exérgia destruída é alta, sendo consequência, dentre outros fatores, da atuação do sistema de controle através da produção de calafrio, que gera um metabolismo adicional para compensar uma maior transferência de energia ao ambiente. Para temperaturas acima da temperatura de neutralidade térmica foi observado que a taxa de exérgia transferida ao ambiente tende a aumentar e que devido ao sinal negativo, provoca uma diminuição da taxa de destruição de exérgia, e um aumento do termo de saída relacionado ao mecanismo sudomotor do sistema de controle. Entretanto, para ambientes úmidos o corpo apresenta dificuldade de transferir energia para o ambiente, devido à supressão do mecanismo sudomotor.

Spanghero et al. (2018) avaliaram a qualidade da conversão de energia no corpo humano durante a atividade muscular afim de propor indicadores de qualidade baseados na análise exérgica (exérgia destruída e eficiência exérgica) e compará-la com os índices tradicionais utilizados no esporte. Foram analisados dois tipos de exercícios físicos, sendo o primeiro exercício aeróbico em bicicleta ergométrica e o segundo uma série contínua de levantamento de peso. Dados fisiológicos como consumo de oxigênio, produção de dióxido de carbono, temperatura da pele e interna e potência realizada foram medidos. O teste da bicicleta se mostrou mais eficiente que o levantamento de peso, na perspectiva da segunda lei, com eficiência exérgica em torno de 40% se a variável exérgica de entrada considerada fosse o ATP, e valores em torno de 30% na avaliação do ciclo completo.

O monóxido de carbono é produzido pelo metabolismo humano, mas em uma taxa muito pequena pode causar danos ao sistema respiratório. Diante desse contexto, Cenzi et al. (2018) avaliaram o impacto da inalação de monóxido de carbono no comportamento exérgico do pulmão humano considerando diferentes níveis de intoxicação e quantidades de hemoglobina, através da análise exérgica aplicada a um modelo do sistema respiratório humano. O modelo computacional de pulmões humanos obtido da literatura foi utilizado para calcular as concentrações de oxigênio ( $O_2$ ), monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ) no sistema respiratório. Três abordagens foram feitas para a exérgia do sangue: Na primeira, o sangue foi considerado como uma mistura ideal de gases líquidos e ideais; na segunda considerou-se os efeitos da associação de monóxido de carbono e oxigênio na dissociação da hemoglobina e do dióxido de carbono; a terceira foi uma abordagem da segunda lei para a transferência de massa que ocorre nos pulmões. Os autores propuseram um modelo de cálculo da eficiência exérgica para os pulmões e, a partir dele, concluíram que um maior nível de intoxicação está associado a menores valores de eficiência, ou seja, de numa elevação da taxa de exérgia destruída. Quando associado à intoxicação por monóxido de carbono, níveis mais altos de hemoglobina também resultam em menor eficiência. Portanto, a aclimação (aumento da concentração de hemoglobina e ventilação) tem efeito positivo no sistema respiratório, reduzindo a taxa de destruição de exérgia.

Na última década, vários trabalhos propuseram o uso de uma perspectiva exérgica para analisar sistemas fisiológicos do corpo humano sob diferentes condições físicas. Os efeitos da redução do fluxo sanguíneo devido a estenose na área da valva aórtica foram estudados por Roll et al. (2019), que propuseram um modelo que levou em consideração as diversas interações fisiológicas entre o sistema cardiovascular e seu entorno dentro do organismo. O modelo termodinâmico avaliou as

irreversibilidades associadas aos processos de conversão de energia relacionados ao metabolismo: exergia destruída nas válvulas, exergia aumentada no fluxo e potência do coração. Observou-se que tanto o metabolismo quanto o trabalho cardíaco aumentam com o aumento da gravidade da estenose, resultado que explica a hipertrofia que ocorre em um coração patológico. Quanto maior o esforço cardíaco, maiores são as perdas e maiores os valores de exergia destruída nas valvas, o que leva a uma diminuição da eficiência exérgica à medida que a patologia evolui. A eficiência exérgica encontrada foi de 15% para um coração saudável, diminuindo em função da gravidade da estenose para valores inferiores a 5%.

No que se diz respeito ao sistema respiratório, Reis e Mady (2019) avaliaram a destruição de exergia e geração de entropia associada aos efeitos da asma e ao aumento de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) no ambiente. Os autores verificaram que o resultado atribuído para a asma não foi condizente com os dados da literatura, devido à ativação de mecanismos compensatórios, como o aumento do débito cardíaco e da frequência respiratória, que, na resposta do modelo, acabaram por superar os efeitos da redução no coeficiente de difusão dos gases, uma vez que a saturação de oxigênio no sangue não diminuiu. Enquanto para o aumento de  $\text{CO}_2$  no ambiente, foi observado um aumento de entropia associada à difusão, bem como um aumento do débito cardíaco.

Cenzi et al. (2019) simularam intoxicação através do transporte de oxigênio, dióxido de carbono e monóxido de carbono entre o sistema circulatório de um feto e o da mãe. Foram implementados três métodos de análise de exergia para o sistema respiratório materno e fetal, visando a comparação com o sistema respiratório de um adulto do sexo masculino. Observou-se que a taxa de exergia destruída pela placenta é significativamente maior em comparação com as irreversibilidades do sistema respiratório da mãe, e uma possível explicação é o fato de a placenta ter outras funções fisiológicas além do transporte de gases. Além disso, a taxa de exergia destruída foi correlacionada com a saturação de oxigênio na hemoglobina, mostrando que a análise de exergia pode ser um índice adequado para avaliar o corpo humano em cenários saudáveis e não saudáveis.

O conforto térmico está fortemente relacionado ao equilíbrio térmico do corpo humano com seu ambiente. Turhan e Akkurt (2019) investigaram a relação entre conforto térmico e consumo de exergia corporal humana em uma zona de clima temperado. Foi analisada a sensação térmica de um ocupante de um edifício exposto a diferentes combinações de temperatura interna e temperatura radial média interna, nas estações de inverno e verão. Através do método de cálculo do balanço exérgico do corpo humano foram obtidas as taxas mínimas de consumo de exergia do corpo humano na neutralidade térmica, fornecendo assim, uma melhor previsão dos parâmetros ambientais para condições de conforto do que a abordagem energética.

A evolução dos modelos de análise exérgica do corpo humano para estudo de conforto térmico levou a alguns conjuntos específicos de modelos contemporâneos que compartilham do mesmo modelo fisiológico subjacente. Entretanto, ainda existem muitas inconsistências entre eles, desde expressões de termos específicos até magnitudes de taxas de exergia destruída. Guo et al. (2019) realizaram um estudo que, a partir dos métodos de modelagem existentes na literatura, analisaram analiticamente e numericamente os quatro maiores contribuintes para o consumo de exergia do corpo humano, sendo eles a taxa metabólica, perda de exergia por radiação, convecção e evaporação. Sendo a taxa metabólica a suposição fundamental de todos os modelos exérgicos do corpo humano existentes, foi testada a possibilidade de incorporar a taxa metabólica de diferentes idades, gêneros, estaturas e pesos. Foram observadas superestimações da exergia do metabolismo em até 20% e subestimações da mudança de exergia por radiação. Também foi possível propor uma nova expressão que quantifica as trocas de exergia de radiação do corpo humano, contabilizando as superfícies da cabeça e das mãos expostas em relação a temperaturas de referência mais específicas, as diferenciando do resto das superfícies da roupa.

Partindo do pressuposto de que há lacunas na literatura quando se trata da análise do desempenho exérgico de um sistema respiratório humano, Dutta e Chattopadhyay (2020) elaboraram um modelo levando em consideração três diferentes elementos para a transferência de exergia: trabalho muscular, fluxo sanguíneo no sistema respiratório e respiração. O modelo

foi avaliado sob diferentes condições, sendo a eficiência do sistema respiratório humano dependente de parâmetros ambientais, atividade física, idade, gênero e estado de saúde. A análise realizada sobre o ponto de vista do gênero e da idade mostrou-se relevante para o estudo. Para homens, em certas condições fisiológicas, a eficiência do sistema respiratório aumenta até os 30 anos e depois diminui gradativamente, enquanto nas mulheres, essa eficiência diminui entre os 20 e 30 anos. Além disso, em determinada idade, o desempenho respiratório masculino torna-se melhor que o feminino em função da quantidade de hemoglobinas, que no sangue da mulher é menor quando comparada a do homem.

Deshko et al. (2020) utilizaram a aplicação da abordagem exergética a modelos de conforto térmico e desenvolveram modelos de regressão que ampliaram a gama de fatores de influência, a saber, atividade humana, tipo de roupa e ponto de referência exergético, para uso em períodos frios e quentes. Os modelos oferecem a possibilidade de avaliar o desempenho e a economia de energia ao determinar a temperatura interna confortável com base no modelo de regressão proposto. Modelos matemáticos dinâmicos para amostras representativas de salas com diferentes parâmetros de projeto (orientação, geometria) e propriedades termofísicas também foram desenvolvidos pelos autores. Além disso, foi estabelecido que a diminuição da temperatura ambiente provoca um aumento no consumo de exergia do corpo humano e o valor da temperatura confortável do ar ambiente permanece praticamente inalterado.

Souza (2020) analisou os processos que ocorrem no coração humano por uma visão energética e exergética e, através disso, investigou o que ocorre quando um coração saudável é submetido à uma condição de Doença de Chagas. De acordo com a autora, o coração pode ser modelado por meio dessa visão termodinâmica, dado que o comportamento do coração é muitas vezes comparado ao de uma bomba, pois gera-se uma pressão elevada responsável por movimentar o sangue, levando a uma reflexão sobre o valor energético dos processos que ocorrem durante o bombeamento. Foi observado que todos os aspectos físicos da doença que levam a alteração não apenas de forma e de tamanho, mas também de pressão exercida por um coração chagásico, consequência direta das alterações no músculo cardíaco, relacionaram-se a uma diminuição da eficiência exergética desse coração em relação ao saudável.

O corpo humano possui a capacidade de manter sua temperatura constante, entretanto, às vezes o equilíbrio térmico dinâmico é perturbado e o corpo passa a produzir/absorver mais calor do que dissipa. Nesse contexto, Mahmood et al. (2020) modelaram estados de hipertermia através da equação do equilíbrio exergético do corpo humano. Uma técnica de hipertermia induzida foi utilizada para avaliar as extremidades da geração de calor metabólico e outros parâmetros dependentes. Além disso, um estudo de caso também foi realizado para calcular os parâmetros de importância primordial, ou seja, consumo de exergia e taxa de geração de entropia, para fornecer os máximos de energia térmica acumulativa e exaustiva do corpo, respectivamente. Os estados resultantes foram analisados para configurar intervalos críticos para fornecer as diretrizes para a terapia de reabilitação. Os resultados indicaram que a abordagem baseada em exergia é adequada para modelar hipertermia em limites fisiopatológicos, ao contrário das abordagens existentes que são predominantemente limitadas ao domínio fisiológico. Além disso, foi desenvolvido de um manequim médico térmico que simula a circulação sanguínea em humanos, que foi usado como validação da abordagem baseada em exergia.

Molliet e Mady (2021) elaboraram um modelo computacional baseado em um modelo fenomenológico de sistemas térmicos humanos para representar os corpos masculino e feminino, bem como suas diferenças fisiológicas, para atender às condições de conforto térmico. Os indicadores de exergia foram comparados com os índices tradicionais utilizados para avaliar o conforto térmico em ambientes de ar-condicionado. Concluiu-se que as mulheres exigem temperaturas de conforto mais elevadas do que os homens. As temperaturas de conforto das mulheres na fase lútea, período do ciclo hormonal feminino que se inicia após a ovulação e dura aproximadamente 14 dias, sendo marcada pelo aumento da descarga de hormônios estrogênio e progesterona, foram semelhantes às dos homens com roupas mais leves e mais baixas durante a fase folicular.

Çatak et al. (2021) propuseram modelos para avaliar o sistema respiratório humano em pacientes saudáveis, obesos e com síndrome de hipoventilação por obesidade (SHO). Os equilíbrios de energia, exergia e entropia foram empregados ao sistema muscular respiratório como uma função da equação da eficiência da segunda lei da termodinâmica para os cálculos de consumo de glicose, destruição da exergia e geração de entropia. Foi revelado que pessoas com obesidade e SHO consomem maiores quantidades de energia para alcançar um processo respiratório similar ao de uma pessoa saudável. Este resultado está atrelado à maior destruição de exergia e geração de entropia em eficiências da segunda lei mais baixas. Ou seja, a quantidade de exergia necessária para obter-se uma certa quantidade de trabalho diminui à medida que a eficiência aumenta.

A partir de uma análise baseada na segunda lei da termodinâmica, Dutta e Chattopadhyay (2021) desenvolveram um modelo termodinâmico do sistema respiratório humano e quantificaram os efeitos da temperatura inspiratória do ar, umidade relativa (UR), capacidade pulmonar e flutuação de oxigênio ( $O_2$ ) na reação metabólica no sistema respiratório humano sob três diferentes condições fisiológicas, sendo elas: repouso, nível moderado de atividade física e nível extremo de atividade física. Foi observado que a eficiência exérgica do sistema respiratório humano diminui em 21% em um nível moderado de atividade e em 16,5% durante a atividade física de nível extremo, em comparação com a condição de repouso. O estudo também demonstrou que a eficiência do sistema respiratório humano aumenta com o aumento da temperatura do ar inspirado e do nível de atividade, de modo que o aumento da temperatura do ar inspiratório leva à diminuição da perda de exergia do sistema. Além disso, observou-se que a eficiência do sistema é máxima durante o repouso, seguido por um nível de atividade extremo e moderado. Para reduzir o suprimento de  $O_2$ , a eficiência do desempenho respiratório humano aumenta. Devido à oxidação parcial da glicose, a transferência de exergia da reação metabólica é menor, levando ao aumento da eficiência exérgica.

Como visto, a segunda lei da termodinâmica pode fornecer novas percepções nos estudos de condições de conforto térmico, pois considera as irreversibilidades internas do metabolismo humano às comunicações externas com o meio ambiente. Ribeiro e Mady (2022) fizeram a comparação entre três métodos de análise exérgica aplicados a um modelo térmico do corpo humano com o objetivo de determinar as condições de conforto térmico, observar as semelhanças entre os modelos e as possíveis modificações para futuras análises que proponham um único método exérgico. Todos os métodos comparados neste trabalho foram discutidos para um modelo térmico abrangente publicado na literatura, onde a transferência de calor e massa, utilizada para os balanços de energia, já havia sido resolvida. Para isso, apenas um tipo de anatomia foi considerado e o corpo humano foi dividido em 15 partes que representavam a cabeça, pescoço, tronco, braços, antebraços, mãos, coxas, pernas e pés. Embora esses métodos modelem os mesmos fenômenos fisiológicos e termodinâmicos, a comparação mostrou que cada método produziu resultados significativamente diferentes e, em certos casos, tais diferenças eram de várias ordens de grandeza.

#### **4. Balanço Exérgico no Corpo Humano**

Na intenção de analisar os processos de conversões energéticas, podemos utilizar o argumento da exergia (Mady et al., 2014a). Para empregar esse argumento ao corpo humano, devemos dividir o corpo em 15 partes/membros, sendo eles: cabeça, pescoço, tronco, braços (2), antebraços (2), mãos (2), coxas (2), pernas (2) e pés (2); além disso, durante as análises exérgicas de cada membro, devemos considerar a combinação existente entre tecidos, pele, gordura, músculo, osso, cérebro, vísceras, pulmão e coração, que variam de acordo com analisado (Mady et al., 2012). Ainda nessa conta é necessário considerar parâmetros físicos do indivíduo; nesse sentido as principais variáveis são gênero biológico, altura, massa corporal total, volume, área superficial do corpo e idade, que estão interligadas pelo chamado metabolismo; também é necessário contabilizar os parâmetros ambientais, espirométricos do indivíduo analisado e, sendo o caso, nível de atividade (Mady et al., 2014b). Contudo, matematicamente, o balanço exérgico instantâneo no corpo humano nu pode ser escrito como (Mady et al., 2012)

$$\frac{dB}{dt} = \sum B_{entra} - \sum B_{sai} + \sum Q_k \left(1 - \frac{T_0}{T_k}\right) - W - B_{destruída}, \quad (1)$$

onde  $\frac{dB}{dt}$  é a exergia instantânea do corpo humano;  $B_{entra}$  e  $B_{sai}$ , são, respectivamente as exergias absorvida e emitida;  $Q_k$  e  $T_k$ , são, respectivamente, o calor e temperatura associados a radiação, convecção, vaporização, respiração, ingestão de comida e água e etc;  $T_0$  é temperatura do corpo;  $W$  é o trabalho;  $B_{destruída}$  a exergia destruída.

Devido as variações térmicas do ambiente com a evolução do tempo, podemos escrever que a exergia instantânea também pode ser escrita como (Mady & Oliveira Junior, 2013)

$$\frac{dB}{dt} = -B_m + \frac{dB}{dt} \Big|_{\Delta T}, \quad (2)$$

sendo  $B_m$  a exergia do metabolismo e  $\frac{dB}{dt} \Big|_{\Delta T}$  é o termo que representa a variação temporal da exergia devido a variação térmica.

Além disso,

$$\frac{dB}{dt} \Big|_{\Delta T} = \frac{dU}{dt} \Big|_{\Delta T} - T_0 \frac{dS}{dt} \Big|_{\Delta T}, \quad (3)$$

onde,  $\frac{dU}{dt} \Big|_{\Delta T}$  e  $\frac{dS}{dt} \Big|_{\Delta T}$ , são, respectivamente, as mudanças temporais energética e entrópica devido a mudança térmica e, matematicamente, podem ser expressas como (Mady et al., 2013),

$$\frac{dU}{dt} \Big|_{\Delta T} = Q_M - (Q_c + Q_r + Q_e + \Delta Q_{res})$$

e

$$\frac{dS}{dt} \Big|_{\Delta T} = \sum_j \left( \frac{dS_{s,j}}{dt} + \frac{dS_{t,j}}{dt} \right)$$

sendo que os sufixos M, c, r, e, res, s e t, fazem referência, respectivamente, ao metabolismo, convecção, radiação, evaporação, respiração, sangue e tecido, e o termo j diz respeito aos membros do corpo avaliado. Utilizando as Eq. (1) e (2), as condições de contorno desse problema e isolando o termo da exergia destruída, chega-se em (Mady et al., 2014b)

$$B_{destruída} = B_M - B_c - B_r - B_e - \Delta B_{res} - W - \frac{dB}{dt} \Big|_{\Delta T}, \quad (4)$$

onde,

$$B_M = Q_M \left(1 - \frac{T_0}{T_M}\right),$$

$$B_r = Q_r \left(1 - \frac{T_0}{T_r}\right),$$

$$B_c = Q_c \left(1 - \frac{T_0}{T_c}\right),$$

$$B_e = \left( \sum \dot{m}_{sai} b_{sai} - \sum \dot{m}_{entra} b_{entra} \right),$$

$$\Delta B_{res} = \dot{m}_{res} \sum_i y_{ex,i} \left\{ c_{p,i} \left[ T_{ex} - T_0 - T_0 \ln \left( \frac{T_{ex}}{T_0} \right) \right] + R_i T_0 \ln \left( \frac{P_{ex,i}}{P_{0,i}} \right) \right\},$$

e

$\left. \frac{dB}{dt} \right|_{\Delta T}$  a Eq. (3), sendo que  $\dot{m}$  é a vazão mássica, os sufixos *res* e *ex* fazem referência a respiração e expiração, respectivamente,  $i$  diz respeito ao tipo de gás (oxigênio, dióxido de carbono, nitrogênio, vapor de água etc.),  $y$  é a fração mássica do gás,  $c_p$  é o calor específico e  $P$  é a pressão parcial do gás.

Contudo, baseado na Eq. (4), podemos tirar obter informações sobre a saúde e qualidade de vida do ser humano avaliado (Mady et al., 2012). Apesar dessa equação estar de certa forma “pronta”, resolvê-la não é uma tarefa simples. Isso se deve ao fato de não existir um consenso em como executar o cálculo de determinados termos, como é o caso da exergia metabólica (Mady & Oliveira Junior, 2013). Além disso, tomar medidas para empregar na expressão também não é algo fácil de se fazer (Mady et al., 2013).

## 5. Considerações Finais

A análise exérgica consiste no emprego da primeira e segunda leis da termodinâmica na avaliação de desempenho de processos de conversão de energia, permitindo efetiva avaliação da qualidade da energia convertida em trabalho útil e identificação das irreversibilidades dos processos reais. O presente artigo buscou realizar uma revisão da literatura acerca da análise exérgica aplicada ao corpo humano, a fim de compreender o seu funcionamento e a irreversibilidade dos processos relacionados aos sistemas do corpo a partir das leis e conceitos da termodinâmica.

Observa-se que existe um crescente interesse no tema ao longo dos últimos anos, dado o elevado número de pesquisas desenvolvidas na área, o que evidencia a sua relevância. As pesquisas desenvolvidas têm apresentado um importante aperfeiçoamento dos modelos matemáticos de análise exérgica, identificando os parâmetros que influenciam na eficiência exérgica e avaliando os impactos causados no corpo humano e seus sistemas. É possível destacar ainda que a compreensão dos princípios físicos de funcionamento do corpo humano como um todo pode ser feito a partir do estudo dos processos realizados individualmente nos órgãos vitais.

Os resultados dos estudos mostram um futuro promissor para utilização do desempenho exérgico no campo da medicina como índice de avaliação da eficiência dos processos biológicos. Como perspectivas futuras, espera-se o desenvolvimento de modelos matemáticos de análise exérgica de órgãos ainda não estudados e utilização de variáveis associadas a patologias que provocam alterações nos sistemas do corpo, possibilitando assim, uma melhor compreensão de mecanismos fisiológicos cujo funcionamento ainda necessita de informações.

## Referências

- Araujo, A. A. Q.; Nascimento, R. S. & Oliveira, R. (2019). Exergia e meio ambiente. IN: Anais do Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, 7(1), 401-406.
- Bandeira, B. D. (2016). Análise das trocas de calor realizadas entre o corpo humano e o ambiente: estudos de caso para uma pessoa realizando atividade física. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- Batato, M.; Deriaz, O.; Borel L. & Jequier, E. (1990). Analyse exérgique, théorique et expérimentale, du corps humain. *Entropie*, 26, 120-130.
- Caliskan, H. (2013). Energetic and exergetic comparison of the human body for the summer season. *Energy Conversion and Management*, 76, 169–176.
- Çatak, J.; Develi, E. & Bayram, S. (2021). How does obesity affect bioenergetics in human respiratory muscles? *Human Nutrition and Metabolism*, 26, 200136.
- Çengel, Y. A. & Boles, M. A. (2013). Termodinâmica. Rio de Janeiro: McGraw-Hill.
- Cenzi, J. R.; Albuquerque, C. & Mady, C. E. K. (2018). The Effect of Carbon Monoxide on the Exergy Behavior of the Lungs. *Bioengineering*, 5(4), 108.
- Cenzi, J. R.; Albuquerque, C. & Mady, C. E. K. (2019). Phenomenological and Thermodynamic Model of Gas Exchanges in the Placenta during Pregnancy: A Case Study of Intoxication of Carbon Monoxide. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(21), 4138-4154.

- Deshko, V.; Buyak, N.; Bilous, I. & Voloshchuk, V. (2020). Reference state and exergy based dynamics analysis of energy performance of the “heat source - human - building envelope” system. *Energy*, 200, 117534.
- Diener, J. R. C. (1997). Indirect calorimetry. *AMB Revista da Associação Médica Brasileira*, 43, 245-253.
- Dovjak, M.; Shukuya, M. & Krainer, A. (2015). Connective thinking on building envelope-human body exergy analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 90, 1015 – 1025.
- Dutta, A.; Chattopadhyay, H. (2020). Exergetic analysis of human respiratory system including effect of age and gender. *International Journal of Exergy*, 31(4), p. 370-385.
- Dutta, A. & Chattopadhyay, H. (2021). Performance analysis of human respiratory system based on the second law of thermodynamics. *Journal of Thermal Biology*, 96, 102862.
- Ferreira, M. S. (2001). Um modelo do sistema térmico do corpo humano. 2001. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Genc, S.; Sorguven, E.; Ozilgen, M. & Kurnaz, I. A. (2013). Unsteady exergy destruction of the neuron under dynamic stress conditions. *Energy*, 59, 422-431.
- Gonçalves, L. C. & Gaspar, P. D. (2011). Energia, Entropia, Exergia – Conceitos úteis e eficiências. International Conference on Engineering UBI2011, University of Beira Interior, Covilhã – Portugal.
- Guo, H.; Luo, Y.; Meggers, F. & Simonetti, M. Human Body Exergy Consumption Models’ Evaluation and Their Sensitivities towards Different Environmental Conditions. *Energy*, 183, 1075-1088.
- Henriques, I. B. (2013). Desempenho exerético do corpo humano e de seu sistema respiratório em função de parâmetros ambientais e da intensidade de atividade física. 2013. 101 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Henriques, I. B.; Mady, C. E. K. & Oliveira Junior, S. (2016). Exergy model of the human heart. *Energy*, 117, 612-619.
- Henriques, I. B.; Mady, C. E. K. & Oliveira Junior, S. (2017). Assessment of thermal comfort conditions during physical exercise by means of exergy analysis. *Energy*, 128, 609-617.
- Lima, S. V. M. A.; Nunes, J.; Santos, L.; Silva, G.; Melo, H. & Chaves, S. (2017). O Programa Mais Médicos e a atenção básica no Brasil: uma revisão integrativa. *Gestão e Sociedade*, 11(30), 1963-1975.
- Mady, C. E. K.; Ferreira, M. S.; Yanagihara, J. I.; Nascimento, P. H. S. & Oliveira Junior, S. (2012). Modeling the exergy behavior of human body. *Energy*, 45(1), 546-553.
- Mady, C. E. K. & Oliveira Junior, S. (2013). Human body exergy metabolism. *International Journal of Thermodynamics*, 16 (2), 73-80.
- Mady, C. E. K.; Albuquerque, C.; Fernandes, T. L.; Hernandez, A. J.; Saldiva, P. H. N.; Yanagihara, J. I. & Oliveira Junior, S. (2013). Exergy performance of human body under physical activities. *Energy*, 62, 370-378.
- Mady, C. E. K. (2014). Desempenho termodinâmico do corpo humano e seus subsistemas: aplicações à medicina, desempenho esportivo e conforto térmico. 2014. 168 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Mady, C. E. K.; Ferreira, M. S.; Yanagihara, J. I. & Oliveira Junior, S. (2014a). Human body exergy analysis and the assessment of thermal comfort conditions. *International journal of heat and mass transfer*, 77, 577-584.
- Mady, C. E. K.; Henriques, I. B. & Oliveira Junior, S. (2014b). Method to perform exergy analysis to the human body and daily exergy balance. In: 15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering.
- Mahmood, I.; Raza, A.; Mehmood, A.; Ahmad, N. & Arif, K. (2020). Evaluation of human brain hyperthermia using exergy balance equation. *Journal of Thermal Biology*, 93, 102723.
- Molliet, D. S. & Mady, C. E. K. (2021). Exergy analysis of the human body to assess thermal comfort conditions: Comparison of the thermal responses of males and females. *Case Studies in Thermal Engineering*, 25, 100972.
- Nóbrega, M. L.; Freire Junior, O. & Pinho, S. T. R. (2013). Max Planck e os enunciados da segunda lei da termodinâmica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 35(3).
- Oliveira Junior, J. B.; Santos, I. S.; Santana, R. C. R.; Alves, G. A. & Santos, N. A. S. (2021). Segunda lei da termodinâmica: Uma revisão bibliográfica. *Cadernos de Graduação - Ciências exatas e tecnológicas*, 7(1), 97-106.
- Patel, A. K. & Rajput, S. P. S. (2021). Thermodynamic life cycle assessment of humans with considering food habits and energy intake. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(1), 531-540.
- Pennes, H. H. (1948). Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm. *Journal of Applied Physiology*, 1(2), 93–122.
- Petela, R. (2010). Engineering thermodynamics of thermal radiation for solar power. New York: McGraw Hill.
- Prek, M. & Butala, V. (2010). Principles of exergy analysis of human heat and mass exchange with the indoor environment. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(25), 5806–5814.

- Rabi, J. A.; Silva, R. L. & Oliveira, C. E. L. (2012). Human thermal comfort: an irreversibility-based approach emulating empirical clothed-body correlations and the conceptual energy balance equation. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 34(4), 450-458.
- Rahman, A. (2007). A novel method for estimating the entropy generation rate in a human body. *Thermal Science*, 11(1), 75-92.
- Reis, M. C. & Bassi, A. B. M. S. (2012). A segunda lei da termodinâmica. *Química Nova*, 35(5), 1057-1061.
- Reis, M. T. & Mady, C. E. K. (2019). Análise exérgica do sistema respiratório em fumantes passivos asmáticos. *Revista dos Trabalhos de Iniciação Científica da UNICAMP*, 27.
- Ribeiro, T. J. S. (2018). Análise exérgica do sistema térmico do corpo humano para avaliação de conforto térmico. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Ribeiro, T. J. S. & Mady, C. E. K. (2022). Comparison among exergy analysis methods applied to a human body thermal model. *Energy*, 239, 122446.
- Rodriguez-Illera, M.; Nikiforidis, C. V.; Goot, A. J. & Boom, R. M. (2017). Exergy efficiency from staple food ingredients to body metabolism: The case of carbohydrates. *Journal of Cleaner Production*, 142, 4101-4113.
- Roll, J. B.; Borges, M. L.; Mady, C. E. K. & Oliveira Junior, S. (2019). Exergy Analysis of the Heart with a Stenosis in the Arterial Valve. *Entropy*, 21(6), 563-575.
- Santos, T. A. (2017). Educação Física na recuperação de usuários de Álcool e Drogas: uma revisão sistemática. 2017. Monografia (Graduação em Educação Física) – Universidade do Estado da Bahia, Jacobina.
- Silva, S. R.; Niquini, G. R.; Turetta, L. F. & Costa, A. O. S. (2018). Aplicação da Propriedade Termodinâmica Exérgica na Avaliação de Processos de Produção de Etanol Lignocelulósico: Uma Revisão. *Revista Virtual de Química*, 10(5), 1263-1279.
- Smith, J. M.; Van Ness, H. C. & Abbot, M. M. (2007). Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química. Rio de Janeiro: Editora LTC.
- Sousa, W. B.; Alencar, M. C. B.; Silveira, D. C.; Moreira, H. W. D. & Martins, K. Y. N. (2020). Análise da influência da exérgia no conforto térmico do corpo humano: Uma revisão integrativa. *Revista Valore*, 5, 5016.
- Souza, C. J. M. (2020). Análise exérgica de um coração: Aplicações a corações sujeitos à Doença de Chagas. XXVIII - Congresso Virtual de Iniciação científica da Unicamp, Campinas.
- Spanghero, G. M.; Albuquerque, C.; Fernandes, T. L.; Hernandez, A. J. & Mady, C. E. K. (2018). Exergy Analysis of the Musculoskeletal System Efficiency during Aerobic and Anaerobic Activities. *Entropy*, 20 (2), 119.
- Turhan, C. & Akkurt, G. G. (2019). The relation between thermal comfort and human-body exergy consumption in a temperate climate zone. *Energy & Buildings*, 205, 109548.